

УДК 621.778

## РОЛЬ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ СДВИГОВЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ ВОЛОЧЕНИИ ЗОЛОТА В ФОРМИРОВАНИИ СВОЙСТВ КОНЕЧНОГО ПРОДУКТА

Юрий Николаевич Логинов

Александр Евгеньевич Первухин

ФГАОУ ВПО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н.Ельцина»

Контактная информация: [j.n.loginov@urfu.ru](mailto:j.n.loginov@urfu.ru)

*Выполнен анализ последствий накопления дополнительной степени деформации за счет сдвигов в периферийных областях. Наряду с повышением уровня нагартовки это явление сказывается на изменении текстурного состояния и температуры рекристаллизации металла.*

**Ключевые слова:** волочение, золото, пластическая деформация.

## SHEAR DEFORMATION ROLE DURING GOLD DRAWING IN FINISHING PRODUCT QUALITY FORMING

Yuri Loginov

Alexandr Pervuhin

FSAEI HPE «UFU named after the first President of Russia B.N. Yeltsin»

Contacts: [j.n.loginov@urfu.ru](mailto:j.n.loginov@urfu.ru)

*Analysis of effects of deformation additional degree accumulation that is appeared because of changes in the peripheral areas is made. Along with increased work, this phenomenon affects the change of metal texture and metal recrystallization temperature.*

**Keywords:** drawing, gold, plastic deformation.

Ограниченное количество научных работ выполнено по исследованию вариантов технологии производства изделий из золота и его сплавов [1, 2]. Одной из проблем в этой области является достижение высоких прочностных свойств металла в финишной обработке (обычно это метод волочения). Золото высокой чистоты подвержено разупрочнению при комнатной температуре, что не допускается нормативными документами.

В соответствии с формулой Бочвара температура начала рекристаллизации  $T_{\text{нр}}$  (градусы Кельвина) определяется выражением

$$T_{\text{нр}} = aT_{\text{п}}, \quad (1)$$

где  $T_{\text{п}}$  - температура плавления,  $a$  - коэффициент пропорциональности. Последняя величина зависит от степени чистоты металла. С уменьшением количества примесей коэффициент  $a$  снижается, что приводит к уменьшению температуры рекристаллизации, часто, вплоть до комнатной температуры.

Опыты по микролегированию кальцием золота чистотой 99,99 % проводились еще в семидесятых годах прошлого века Екатеринбургским заводом ОЦМ, в последующем, при переходе на производство золота чистотой 99,999 % проблема самоотжига готовой продукции только обострилась. Часть металла подвергалась отжигу уже при волочении, а часть - после вылеживания у потребителя.

Идея микролегирования стала прорабатываться за рубежом относительно недавно. Об этом говорит, например, публикация 2006 г. Nanyang Technological University (Сингапур) [3]. Авторы проводили опыты с проволокой из золота чистотой 99,999 % диаметром 25 мкм при суммарном относительном обжатии 99,99 %. Увеличивая содержание кальция от 20 до 60 ppm, они добились повышения временного сопротивления от 460 до 490 МПа, т.е. на 6 %. Здесь же отмечено, что малое влияние на эффект изменения механических свойств оказывает размер зерна и направление его расположения (т.е., по существу, текстура). Повышение прочности металла в какой-то мере свидетельствовало о повышении температуры рекристаллизации. Аналогичное исследование было проведено и описано в статье [4], но в качестве микролегирующей добавки выступал палладий.

Исследователи из Korea Advanced Institute of Science and Technology выполнили работу по изучению влияния степени деформации на температуру рекристаллизации золотой проволоки диаметром 25 мкм [5]. Они нашли, что модуль упругости начинает интенсивно снижаться при температуре 520 °С, что можно соотнести с началом рекристаллизации. Эта температура значительно выше комнатной и такой результат может быть объяснен невысокой чистотой золота на уровне 99,6 %.

Аналогом деформации золота часто выступает медь. В этой области в последнее время благодаря применению современных методик изучено влияние текстурирования на процессы рекристаллизации. Здесь показано, что предпочтительные ориентировки возникают на стадии волочения, они зависят от накопленной степени и условий деформации [6], включая углы наклона образующих волок [7], скорости деформации [8, 9] и т.д. В свою очередь, от вида текстуры зависит ее устойчивость при отжиге [10, 11], что позволяет изменять температуру начала рекристаллизации.

В целом, можно наметить направления, в соответствии с которыми велись или могут производиться исследования данной проблемы.

1. Использование эффекта микролегирования.
2. Учет текстурообразования.
3. Управление частотой термообработок по маршруту волочения.
4. Снижение уровня деформации при тех же значениях коэффициентов вытяжки при волочении.

Последний пункт нуждается в пояснении. В отечественной технической литературе для оценки деформированного состояния при волочении обычно применяется тот же, что и при растяжении показатель степени деформации, который обычно связывают с коэффициентом вытяжки:

$$\varepsilon_0 = \ln \lambda_i = 2 \ln \frac{d_{i-1}}{d_i}, \quad (2)$$

где  $d_{i-1}$  и  $d_i$  – диаметры проволоки до и после волоки в текущем проходе, осуществляемом с коэффициентом вытяжки  $\lambda_i$ .

Вместе с тем, такую деформацию получает лишь осевая область заготовки при радиальной координате  $r = 0$ , поскольку она деформируется по схеме одноосного растяжения за счет уменьшения диаметра и траектория ее перемещения – прямая линия. В периферийной части проволоки деформации оказываются больше за счет дополнительных сдвигов, которые получает металл из-за изменения траектории перемещения через волоку.

В работах [12, 13] отмечено, что угол волоки существенно влияет на уровень нагартовки протягиваемого материала. В статье [14] со ссылкой на работу [15] предложено для оценки дополнительной деформации сдвига при волочении использовать формулу расчета средней по поперечному сечению степени деформации

$$\varepsilon_{cp} = \phi \varepsilon_0, \quad (3)$$

где  $\phi$  – фактор дополнительной работы деформации, значения которого оказываются зависимыми от вида материала. В общем случае  $\phi > 1$ , что приводит к выводу:  $\varepsilon_{cp} > \varepsilon_0$ . Для снижения фактора дополнительной работы деформации надо снижать дополнительные сдвиги, что достигается оптимизацией угла наклона

образующей волоки и длины калибрующего пояска. Эта задача не является на сегодняшний день окончательно решенной. Эффект накопления «лишней» деформации оказывается большим, он суммируется по переходам волочения, так как справедлива формула для определения накопленной степени деформации:

$$\varepsilon_{\Sigma ncp} = \sum_1^n \varepsilon_{icp}, \quad (4)$$

где  $\varepsilon_{icp}$  – частная средняя степень деформации в проходе с учетом дополнительных сдвигов.

Из приведенных формул становится ясным, что «лишняя» накопленная деформация может быть уменьшена оптимизацией очага деформации, тем самым можно повысить температуру начала рекристаллизации и устранить явление самоотжига чистого золота.

### Библиографический список

1. Исследование технологии получения проволоки из сплавов на основе золота / С.Б. Сидельников, Н.Н. Довженко, В.С. Биронт, Е.С. Лопатина, О.С. Лебедева, А.В. Столяров, И.В. Усков, А.П. Шубаков, О.В. Бабушкин // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. - 2010. - № 3. - С. 26-27.
2. Логинов, Ю.Н. Дорнование полой заготовки из сплава золота Ю.Н. Логинов, Б.И. Каменецкий, Г.И. Студенок // Кузнечно-штамповочное производство. - 2006. - №6. - С.36-41.
3. Chew, Y.H. Effects of calcium on the mechanical properties of ultra-fine grained gold wires / Y.H. Chew, C.C. Wong, C.D. Breach, F. Wuiff, S. Mhaisalkar // Journal of Alloys and Compounds. - 2006. - V. 415. Iss. 1-2. - P.193-197.
4. Saraswati, T.S. The effects of Ca and Pd dopants on gold bonding wire and gold rod. / T.S. Saraswati, T. Sritharan, C.I. Pang, Y.H. Chew, C.D. Breach, F. Wulff, S.G. Mhaisalkar, C.C. Wong // Thin Solid Films. - 2004. - V. 462-463. - P. 351- 356.
5. Kim, K.S. Relationship between mechanical properties and microstructure of ultra-fine gold bonding wires / K.S. Kim, J.Y. Song, E.K. Chung, J.K. Park, S.H. Hong // Mechanics of Materials. - 2006. - V.38. - P. 119-127.
6. Расчет деформаций и экспериментальное исследование текстуры в нагартованной медной проволоке / Ю.Н. Логинов, С.Л. Демаков, А.Г. Илларионов, М.С. Карабаналов / Деформация и разрушение материалов. - 2011. - №5. - С. 38-44.
7. Kraft, F.F. The effects of die angle on texture and annealing response of ETP copper wire / F.F. Kraft, U. Chakkingal, G. Baker, R.N. Wright // Journal of materials processing technology. - 1996. - V. 60. - P. 171-178.

8. Bhattacharyya, A. Effect of strain rate on deformation texture in OFHC copper / A Bhattacharyya, D. Rittel, G. Ravichandran // Scripta Materialia. – 2005. - V. 52. - P. 657 - 661.
9. Влияние скорости деформации на свойства электротехнической меди / Ю.Н. Логинов, С.Л. Демаков, А.Г. Илларионов, А.А. Попов // Металлы. - 2011. - № 2. - С. 3 ].
10. Unusual Young's modulus behavior in ultrafine-grained and microcrystalline copper wires caused by texture changes during processing and annealing/ P.P. Pal-Val, Yu.N. Loginov S.L Demakov, A.G. Illarionov, V.D. Natsik, L.N. Pal-Val, A.A. Davydenko., A.P Rybalko // Materials Science and Engineering: A. - 2014. -V. 618. –P. 9-15.
11. Влияние температуры отжига на текстуру в медной проволоке / С.Л. Демаков, Ю.Н. Логинов, А.Г. Илларионов, М.А. Иванова, М.С. Карабаналов // Физика металлов и металловедение. - 2012. - Т. 113.- №7. - с. 720-726.
12. Логинов, Ю.Н. Исследование влияния угла конусности волокна на механические свойства протянутого полуфабриката / Ю.Н. Логинов, П.Д. Василевский, Л.В. Радионов // Цветные металлы. - 2004.-№6.-С. 104-106.
13. Логинов, Ю.Н. Влияние угла рабочей зоны волокна на напряженное состояние в очаге деформации при волочении меди. Ю.Н. Логинов // Цветные металлы. - 2010. - № 3. - С. 94-97.
14. Chin, R.K. A computational study of strain inhomogeneity in wire drawing / R.K. Chin, P.S. Steif// Int. J. Mach. Tools Manufact. – 1995 . - V. 35. - No. 8. -P. 1187-1198.
15. Atkins, A.G. The incorporation of work hardening and redundant work in rod-drawing analyses / A.G. Atkins, R.M. Caddell // Int. J. Mech. Sci. - 1968. - V.10. – P. 15-28.